干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

1971—2018年陕西省人体舒适度时空分布特征研究

雷杨娜， 张 侠， 赵晓萌
（陕西省气候中心，陕西 西安 710014）

摘 要：根据陕西省94个气象观测站1971—2018年逐日气象资料，对人体舒适度指数（I_{CHB}）时空分布特征及其影响因子权重进行了统计分析。结果表明：（1）陕西近48 a省I_{CHB}呈现显著上升趋势，线性趋势达到0.07·a^{-1}，陕北、关中和陕南地区年际变化与全省变化趋势基本一致。四季I_{CHB}变化均呈上升趋势，其中春季上升趋势最为显著，冬季次之，秋季最低，四季I_{CHB}在2000年以来增幅减缓。各区四季I_{CHB}年际变化与全省趋势一致，各区I_{CHB}夏季差异最小，冬季最大。I_{CHB}月变化呈单峰型，1月最低，7月最高。（2）陕西各地I_{CHB}介于26～52之间，体感属于冷、凉和凉爽等级。I_{CHB}空间分布差异显著，陕南地区最高，其次是关中，陕北地区最低。四季I_{CHB}分布特征与全年分布特征相似，均呈现自北向南逐步升高的趋势。（3）R/S分析预测未来气温将升高，风速则呈减少趋势，I_{CHB}将继续升高，四季气候舒适性将发生改变。（4）温度（湿度、风速）与I_{CHB}存在显著的正（负）相关关系，温度和风速是影响陕西省I_{CHB}的最主要因子，且二者影响程度基本相当，湿度主要通过温度影响I_{CHB}。3个地区温度的正影响和风速的负影响均较大，关中地区3个要素之间互相影响较大；陕北和陕南地区各要素之间互相影响较小，对I_{CHB}的直接影响较大。

关键词：人体舒适度指数；时空特征；通径分析；陕西省
文章编号：

IPCC第五次气候变化评价报告[1]指出，全球平均气温2003—2012年比1850—1900年上升了0.78 ℃，气候因子随时间的变化必然会导致人体舒适度的变化[2]。人体舒适度是一个生物气象指标，它从气象角度评价不同气候条件下人体的舒适程度，该指标主要反映人类机体与大气环境之间的热交换情况。目前，人体舒适度已经成为人们进行人居环境、旅游气候资源评价等的一项重要指标[3]。人体舒适度指数（Comfort Index of Human Body，简称I_{CHB}）就是能较好地反映多数人群身体感受的一项综合气象指标或参数，人体舒适度指数主要取决于气温、相对湿度、风速3个气象要素。人体舒适度的研究可帮助人们对大气环境有所了解，提醒人们根据气象要素的变化及时采取措施，适应环境变化，预防疾病发生，减少工作、生活决策失误等[4]。

随着社会发展和物质生活水平的不断提高，人们对各地生活宜居性和人体舒适性也越来越关注。因此，近些年很多省份对人体舒适度的研究开始增多，如山东[5]、甘肃[6]、青海[7]、京津冀[8]等地均有开展人体舒适度时空分布特征的研究，云南[9]、宁夏[10]则开展了本省的旅游气候舒适度分析，山西[11]、江苏[12]以及针对全国[13]近几十年的人体舒适度指数的变化特征进行分析，河南[14]则对不同的人体舒适度气候指数进行了对比分析。陕西地跨黄河、长江两大流域，境内山原起伏，地形多样，气候复杂多变，以秦岭为界，南北气候差异显著，不同地区人体舒适程度亦存在较大差异，且近几十年来陕西地区气候变化显著[15]，但陕西省人体舒适度时空分布特征及主要影响因子方面研究较少。

本文利用陕西省94个气象观测站1971—2018年近50 a的逐日气象资料，对陕西省四季及全年的人体舒适度进行分析，研究气候变化背景下[16-18]，陕西全省及各地区人体舒适度的时空分布特征，并分析人体舒适度与各气象要素的相关关系，研究人体

收稿日期：2019-04-25； **修订日期**：2020-06-10
基金项目：陕西省气象局青年科研基金项目（2017Y-4）资助
作者简介：雷杨娜（1983-），女，陕西澄城人，硕士，高级工程师，主要从事气候变化方面研究. E-mail: lyn0913@163.com

舒适度对气象要素响应程度。通过研究,揭示全省人体舒适度变化规律,提示人们针对气象因子变化来调节生理和适应环境,为城市大气环境评价、旅游气候资源开发等提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料来源

本文所用资料为陕西省97个气象台站1971—2018年的逐日平均温度(以下简称温度)、平均相对湿度(以下简称湿度)和平均风速(以下简称风速)3个气象要素,剔除富县站、黄陵站和三原站等三个不满30 a观测的气象站资料,共使用94个观测站资料。四季划分标准为:春季为每年3~5月、夏季6~8月、秋季9~11月、冬季为当年12月~次年2月。

1.2 人体舒适度计算方法

人们对人体舒适度的研究开始于20世纪40年代,1945年Brunt讨论了气候和人体舒适度的关系,1966年TERJUNG[19]首次提出了气候舒适性指数,后来许多国内外学者都陆续对人体舒适度进行描述和定义,例如人体舒适度指数、体感温度、炎热指数、风寒指数、综合舒适度指数等[20-22],国内关于人体舒适度的研究起步较晚,提出的计算公式也不尽统一,但基本上都是上述几种方法的变形[23-24]。本文采用我国大多气象台站常用的人体舒适度指数[25-27]经验公式,并按照中国气象局规定的统一标准将其分为9个级别[7](表1),具体计算方法如下:

$$I_{CHB}=(1.8T+32)-0.55(1-RH/100)\times(1.8T-26)-3.2\sqrt{V} \quad (1)$$

式中:T为温度(℃);RH为湿度(%);V为风速(m·s^{-1})。

表1 中国气象局人体舒适度指数(I_{CHB})等级标准

Tab. 1 CMA's standard of I_{CHB}

等级	I_{CHB}	级别	体感
1	≤ 25	冷不舒适	极冷,很不舒适,应注意保暖
2	25~38		很冷,大部分人不舒适
3	39~50		冷,少部分人不舒适,早晚偏冷
4	51~55	舒适	凉爽,大部分人舒适,早晚偏凉
5	56~70		舒适,大部分人很舒适
6	71~75		暖,大部分人舒适
7	76~80	热不舒适	热,少数人不舒适,中午炎热
8	80~85		炎热,大部分人不舒适,谨防中暑
9	>85		酷热,很不舒适,严防中暑

1.3 通径分析法

通径分析主要用来分析多个自变量与因变量之间的线性关系,是回归分析的拓展。当存在多个自变量且自变量对可能因变量产生协同影响,这时可以采用通径分析。由于温度、湿度和风速3个气象要素之间本身存在相互影响,因此,需要进行通径分析研究各要素与人体舒适度间的线性关系。通径分析法(Path Analysis)最早在1921年由WOLFLE[28]提出,是在多元回归基础上对相关系数进行分解,分别得到直接通径系数和间接通径系数,通过2种不同的通径系数来表达各变量对因变量所起作用的大小[13,28]。

通径分析在自变量与因变量相关分析基础上建立通经模型,通经模型是一组多元线性方程,反映自变量、中间变量和因变量之间的相互关系[29],计算方法如下:

$$\begin{cases} P_1+r_{12}P_2+r_{13}P_3=r_1 \\ r_{21}P_1+P_2+r_{23}P_3=r_2 \\ r_{31}P_1+r_{32}P_2+P_3=r_3 \end{cases} \quad (2)$$

式中:r_{ij}为各自变量之间的相关系数;r_i为自变量与因变量之间的相关系数。$r_{ij}P_i\,(j\neq i)$为X_i通过X_j对Y形成的间接通径系数。

1.4 R/S分析法

R/S分析法(Rescaled Range Analysis)由水文学家Hurst提出,该方法主要通过计算Hurst指数($0<H<1$),判断时间序列是完全随机还是存在变化趋势[30]。R/S分析方法基本原理和方法如下:

对于一个时间序列$\{x_t\}$,把它分为A个长度为N的等长子区间,对于每一个子区间,设

$$X_{t,n}=\sum_{u=1}^{t}(x_u-M_n) \quad (3)$$

式中:M_n为第n个区间X_u的平均值;$X_{t,n}$为第n个区间的累计离差。令

$$R=\max\left(X_{t,n}\right)-\min\left(X_{t,n}\right) \quad (4)$$

若以S表示X_u序列的标准差,则可定义重标极差R/S,它随时间而增加。Hurst通过长时间的实践总结,建立了如下关系:

$$R/S=K(n)^H \quad (5)$$

对(5)式两边取对数,得到(6)式:

$$\log(R/S)_n=H\log(n)+\log(K) \quad (6)$$

对$\log(n)$和$\log(R/S)_n$进行最小二乘法回归就

可以估计出H即Hurst指数的值。

Hurst指数主要有3种形式：当$0.5 < H < 1$时，表明序列未来变化趋势与过去保持一致，H值越大，持续性越强；当H=0.5时，表明序列未来变化趋势与过去变化趋势无关；当$0 < H < 0.5$时，表明该序列未来变化趋势与过去相反，H值越小，反向趋势越强，根据已有研究进一步定义：强反持续性（$0 < H \leq 0.35$），弱反持续性（$0.35 \leq H < 0.5$），弱持续性（$0.5 < H \leq 0.65$），强持续性（$0.65 < H \leq 1$）。

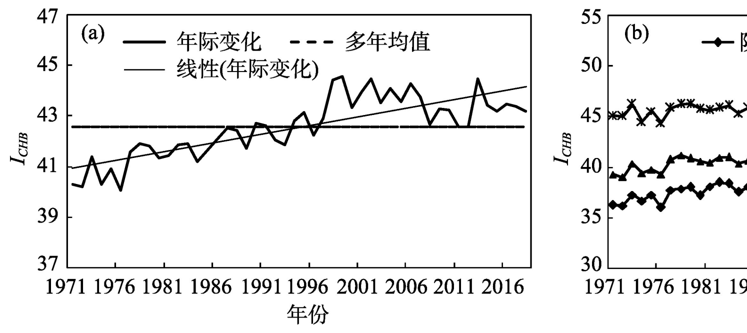
2 结果与分析

2.1 人体舒适度时间演变特征

2.1.1 人体舒适度年际变化 从1971—2018年陕西省的I_{CHB}变化（图1a）总体变化特征来看，近48 a陕西省年均I_{CHB}年际变化明显，存在显著上升趋势，变化率为$0.07 \cdot a^{-1}$，通过了95%的信度检验。尤其是从1990年代中期开始上升趋势增强，随后趋于平稳，上升趋势减缓。1990年以前I_{CHB}均小于多年均值，1992—1996年在平均值上下震荡，1997年以后I_{CHB}均大于平均值。由图1b可知，陕西省3个区年均I_{CHB}在数值上存在一定差异，其中陕南地区>关中>陕北，各地区之间平均相差8左右，但3个地区的年际变化整体上基本一致，均表现为显著的上升趋势，陕北、关中和陕南地区线性趋势分别为$0.05 \cdot a^{-1}$、$0.09 \cdot a^{-1}$和$0.05 \cdot a^{-1}$，且通过了95%信度检验。

比较1971—2018年全省各季节I_{CHB}逐年变化（图2），可以看出，夏季I_{CHB}最高，冬季最低，2个季节平均相差33。近48 a来四季I_{CHB}均呈上升趋势，冬春季上升趋势显著，其中春季线性趋势达$0.1 \cdot a^{-1}$，秋季线性趋势最低为$0.05 \cdot a^{-1}$，各季节上升趋势均通过95%信度检验。另外也可发现，四季I_{CHB}在21世纪以来增幅减缓，秋、冬季在2001年以后I_{CHB}有所下降。四季I_{CHB}年际变化显著，其中秋季波动幅度明显大于其他3个季节，尤其在1980—1990年代。

由陕西省各区四季的I_{CHB}历年变化（图3）可以发现，陕西省3个区四季I_{CHB}年际变化特征与全省相似。通过比较可知，各区之间I_{CHB}差异夏季最小，陕北和陕南地区相差5左右，冬季最大，达到了10以上。就变化趋势来看，春、夏两季3个区上升趋势均



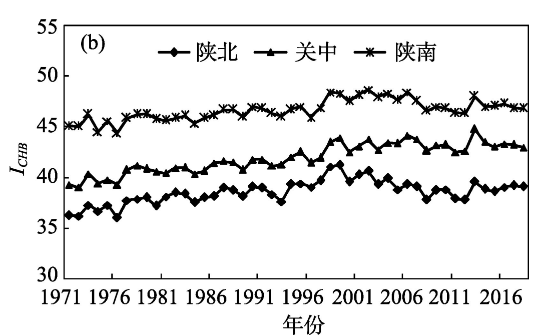


图1 1971—2018年陕西省（a）及各地区（b）人体舒适度指数逐年变化

Fig. 1 Annual variation of I_{CHB} in Shaanxi Province (a) and each region of Shaanxi Province (b) from 1971 to 2018

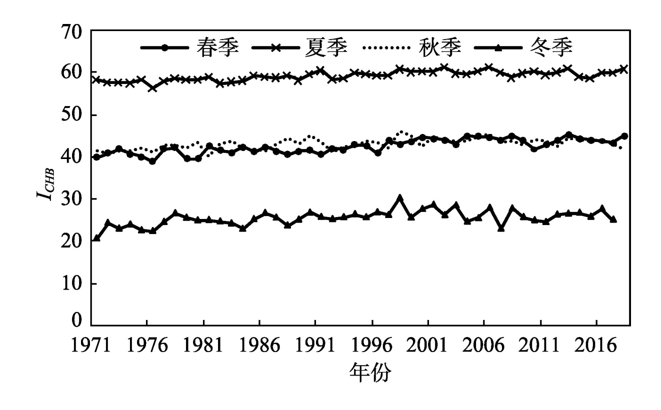


图2 1971—2018年陕西省四季人体舒适度指数逐年变化

Fig. 2 Annual variation of I_{CHB} in four seasons in Shaanxi Province from 1971 to 2018

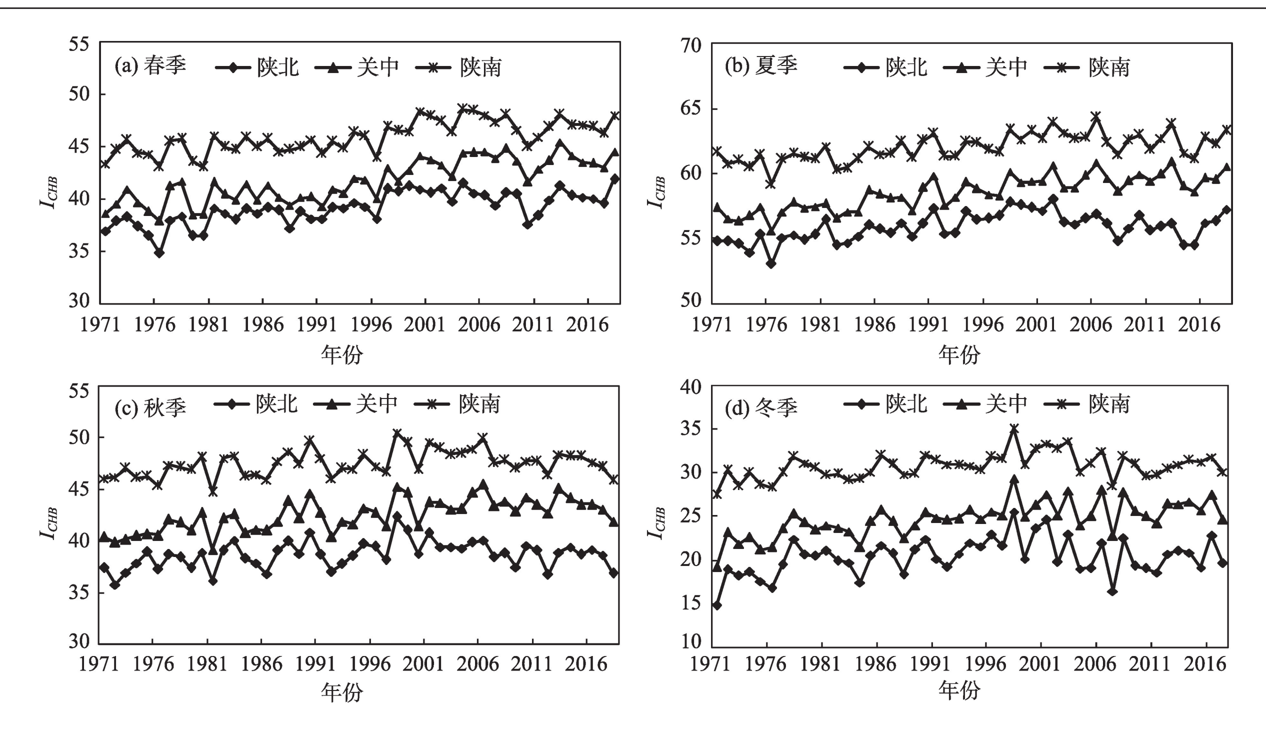


图3 1971—2018年陕西省各区四季人体舒适度指数历年变化

Fig. 3 Annual variation of seasonal I_{CHB} in each region of Shaanxi Province from 1971 to 2018

较为显著,而秋、冬季除关中地区外,陕北和陕南上升趋势不明显。3个区各季节线性趋势比较来看,四个季节均是关中地区上升趋势最为显著,而陕北和陕南地区线性趋势基本一致,较关中地区偏小。

陕西省各气象要素及I_{CHB}的Hurst指数计算结果见表2。陕西省及3个地区气温、风速和相对湿度的Hurst指数均大于0.5,说明未来全省和各地区3个气象要素将维持现有变化趋势。经分析,近48 a来,全省及各区气温升高,风速变小,相对湿度变化趋势不显著,说明未来全省及各区气温将升高,风速减小。

通过R/S分析,计算全省及各区人体舒适度的平均Hurst指数(表2),其值均大于0.5,表明未来陕西及各区I_{CHB}将持续现有的上升趋势。陕西省及各区四季的I_{CHB}与等级见表3。从表3可看出,陕南春

表2 陕西省及各地区气象要素Hurst指数

Tab. 2 Hurst index of meteorological elements in Shaanxi Province and each region of Shaanxi Province

地区	气温	相对湿度	风速	I_{CHB}
陕西省	0.911	0.731	0.916	0.928
陕北	0.906	0.702	0.923	0.863
关中	0.905	0.754	0.920	0.944
陕南	0.901	0.672	0.905	0.898

表3 陕西省及各区各季节人体舒适度指数与等级

Tab. 3 Seasonal I_{CHB} and classification in Shaanxi Province and each region of Shaanxi Province

	陕西省		陕北		关中		陕南	
	I_{CHB}	等级	I_{CHB}	等级	I_{CHB}	等级	I_{CHB}	等级
春	42	3	39	3	42	3	46	3
夏	59	5	56	4	59	5	62	5
秋	43	3	39	3	43	3	48	3
冬	26	2	20	1	25	1	31	2

季、夏季和陕北、关中冬季I_{CHB}值均在其所处等级的最高临界值附近,未来I_{CHB}持续现有上升趋势,各地区相应季节人体舒适度等级也可能随之变化,这样就可能导致在春、秋、冬季节人居气候环境更为舒适,但夏季等级上升则有可能导致偏热日数增多,夏季的人居气候环境舒适性可能会下降。

2.1.2 人体舒适度月变化 从陕西省I_{CHB}逐月曲线图可以看出(图4),全省各月平均I_{CHB}范围为23~61,呈单峰型变化,冬季1、2、12月份I_{CHB}较低,在30以下,最低月均为1月;3月份气温回升,I_{CHB}也随之上升,7月份达到一个极大值;而后进入秋季,气温下降,9月份开始舒适度指数又逐渐下降。

分析各区I_{CHB}月变化(图4),各区I_{CHB}差异明显,陕南地区最高,陕北则最低,3个地区各月平均I_{CHB}范围分别为18~58、23~60、29~64。各区I_{CHB}同全省

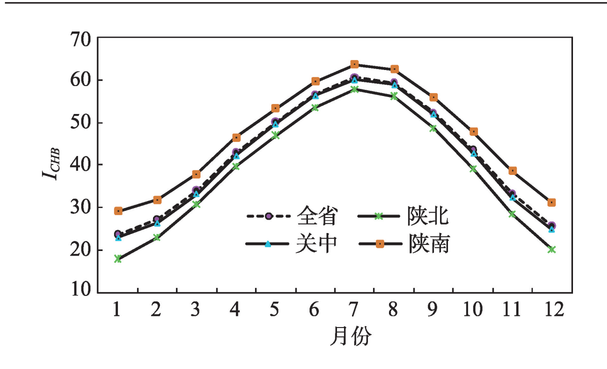


图4 1971—2018年陕西省及各区人体舒适度指数月变化

Fig. 4 Monthly variation of I_{CHB} in Shaanxi Province and each region of Shaanxi Province

一样，均呈单峰型变化，冬季1月、12月I_{CHB}最低，夏季6~8月I_{CHB}最高。但各区I_{CHB}月变化趋势存在差异，其中，1~2月差异显著，3月开始差异逐渐缩小，10月以后差异又逐渐变大。

陕北地区1、2和12月体感均为寒冷，11月为冷，关中地区仅1月和12月寒冷，2月为冷，而陕南地区体感则没有寒冷，可见3个地区冬季各月I_{CHB}差异较为显著，陕北地区冬季明显较其他两个地区漫长；5~9月陕北地区除7月和8月体感为舒服外，其余几月均为凉，关中地区则是夏季6~8月均为舒服，5月和9月为凉爽，而陕南地区除5月体感为凉爽外，其余几月均为舒服，可见陕南地区夏季较关中和陕北地区偏长，入夏早，入秋晚。

2.2 人体舒适度空间分布特征

由全省多年平均年及四季舒适度空间分布图(图5)可以看出，陕西各地I_{CHB}在26～52，体感属于冷至凉爽等级。全省人体舒适度空间分布差异显著，整体来看，陕南地区I_{CHB}最高，介于40～52之间，其中，在安康市岚皋县、紫阳县和白河县有1个高值

图5 1971—2018年陕西省年及四季人体舒适度指数空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of annual and seasonal I_{CHB} in Shaanxi Province

中心;其次是关中地区,I_{CHB}介于26~48之间,高值中心位于西安市户县、咸阳市武功、兴平一带,有2个低值中心,分别位于华山和太白地区,这里属于高山地区,I_{CHB}为全省最低地区;陕北地区整体I_{CHB}最低,介于33~43之间,在延安市延川县、延长县及吴堡县有2个高值中心,该分析结果整体上与实际感受吻合。

从陕西省人体舒适度四季空间分布特征可以看出(图5),四季分布特征与全年分布特征相似,均呈现自北向南逐步升高的趋势。四季对比来看,全省各地区四季I_{CHB}大致呈上升—上升—下降—下降的变化趋势。春季气温开始回升,人体舒适度也逐步提高,除榆林大部分县区,延安市洛川、黄龙地区,咸阳西北部长武、旬邑及华山和太白2个高山地区I_{CHB}<38偏冷外,全省其他地区I_{CHB}均>38,均属于凉。舒适度指数高值区主要分布在汉中、安康南部地区。进入夏季,气温普遍偏高,I_{CHB}普遍升高,全省各地I_{CHB}在42~66之间,其中陕北榆林地区,咸阳西北部,延安洛川、黄龙和铜川宜君等山区地区及华山、太白I_{CHB}<55,体感为凉爽,其他地区I_{CHB}均在55以上,较为舒服。10月份进入秋季,气温开始下降,I_{CHB}也开始降低,在27~53之间,偏冷地区和高值中心与春季分布基本一致。冬季I_{CHB}整体很低,在11~37之间,陕北、关中北部地区I_{CHB}均<25,体感属于寒冷,关中中南部和陕南地区I_{CHB}介于25~38之间,体感属于冷,较陕北和关中北部地区舒适。

2.3 人体舒适度指数影响因子权重分析

2.3.1 全省人体舒适度指数影响因子权重分析 分析各气象要素与I_{CHB}相关性(表4)可知,温度、湿度、风速与I_{CHB}均呈显著相关,其中,温度与I_{CHB}为正相关,且相关系数最大,说明影响I_{CHB}的最主要气象因子是温度;风速和湿度与I_{CHB}为负相关且风速与I_{CHB}的相关系数绝对值较大,可见风速对I_{CHB}的影响大于湿度对其的影响。分别计算3个气象要素对于I_{CHB}的通径系数可知,温度和风速的直接通径系数较大,说明它们可直接影响I_{CHB},而湿度的直接通径系数很小,但湿度通过温度的间接通径系数较大,说明湿度主要通过温度间接影响I_{CHB}。

2.3.2 各地区人体舒适度指数影响因子权重分析 对陕西省3个区进行通径分析(表4)可知,3个地区温度和风速与I_{CHB}的相关系数均较大,绝对值在0.7以上,达到0.01显著水平,说明温度和风速均为影响3个地区I_{CHB}的主要因子。但各区湿度对I_{CHB}的影响有所不同,陕北和关中地区湿度与I_{CHB}的相关系数分别为−0.311 2和−0.436 1,均达到显著水平,说明湿度对陕北和关中地区的I_{CHB}影响也较大;而陕南地区湿度与I_{CHB}的相关系数仅为−0.009 9,说明陕南地区湿度对I_{CHB}的影响较小。

分析直接通径系数可知,陕北地区温度的直接通径系数绝对值在3个要素中最高,为0.611,说明温度对陕北地区人体舒适度的直接影响最大;关中和陕南地区则是风速的直接通径系数绝对值最高,

表4 陕西省及各地区人体舒适度指数与各影响因子通径系数

Tab. 4 Path coefficient of I_{CHB} and impact factors in Shaanxi Province

地区	要素	与I_{CHB}相关系数	直接通径系数	间接通径系数			
				温度	湿度	风速	合计
全省	温度	0.825 1**	0.581**	–	0.027 1	0.216 8	0.243 9
	湿度	−0.307 8*	−0.057	−0.276 6*	–	0.029 2	−0.247 4
	风速	−0.794 7**	−0.586**	−0.214 9	0.002 8	–	−0.212 1
陕北	温度	0.757 4**	0.611**	–	0.037 5	0.113 3	0.150 8
	湿度	−0.311 2*	−0.132	−0.173 4	–	−0.007 5	−0.180 9
	风速	−0.710 6**	−0.591**	−0.117 1	−0.001 7	–	−0.118 8
关中	温度	0.827 1**	0.540**	–	0.028 8	0.257 9	0.286 7*
	湿度	−0.436 1**	−0.045	−0.345 7*	–	−0.044 4	−0.390 2*
	风速	−0.837 7**	−0.604**	−0.230 6	−0.003 3	–	−0.233 9
陕南	温度	0.775 9**	0.567**	–	0.021 3	0.188 5	0.209 7
	湿度	−0.009 9	−0.070	−0.172 1	–	0.228 9	0.056 8
	风速	−0.774 8**	−0.627**	−0.170 4	0.025 6	–	−0.144 9

注:**表示$P<0.01$;*表示$P<0.05$;$r_{0.01}=0.361$;$r_{0.05}=0.270$

说明风速对关中和陕南地区人体舒适度直接影响最大。但也可发现，3个地区温度和风速的直接通径系数绝对值相差较小，说明对3个地区来说，温度和风速均是对人体舒适度直接影响较大的因子。3个地区湿度直接通径系数均未达到显著水平，说明3个地区湿度对人体舒适度的直接影响均很小。

分析间接通径系数可知，仅关中地区温度和湿度的间接通径系数达到了显著水平，主要是湿度通过温度影响I_{CHB}，说明关中地区3个要素之间互相影响较大。陕北和陕南地区各气象要素的间接通径系数均较小，说明各要素对I_{CHB}主要表现为直接影响。

3 结 论

利用陕西省94个气象站近48 a的逐日气象资料，主要分析了陕西省及各地区I_{CHB}时空变化特征及I_{CHB}的影响因子权重，研究结果表明：

（1）1971—2018年，陕西省的年均I_{CHB}呈现显著的上升趋势，变化率为$0.07\cdot a^{-1}$。陕北、关中和陕南地区年均I_{CHB}在数值上存在差异，年际变化整体上较为一致，均存在着显著的上升趋势，线性趋势分别为$0.05\cdot a^{-1}$、$0.09\cdot a^{-1}$和$0.05\cdot a^{-1}$。四季I_{CHB}均有显著的上升趋势，其中春季上升趋势最为明显，冬季次之，而秋季最低，四季I_{CHB}在20世纪以来增幅减缓。3个地区四季I_{CHB}年际变化特征与全省总体趋势相似。各月I_{CHB}呈单峰型变化，最低月为1月，7月份达到极大值，9月份又逐渐下降。各区月I_{CHB}差异明显，1~2月差异显著，3月开始差异逐渐缩小，10月以后差异又逐渐变大。根据现阶段各气象要素的变化趋势预测，未来全省及各区I_{CHB}将持续升高，春、秋、冬季节I_{CHB}升高可能会使人居气候环境更为舒适，但夏季等级上升则有可能导致偏热日数增多。

（2）陕西各地I_{CHB}介于26～52之间，体感属于冷、凉和凉爽等级。I_{CHB}空间分布差异显著，陕南地区最高，介于40～52之间；其次是关中地区，介于26～48之间；陕北地区最低，介于33～43之间。四季I_{CHB}分布特征与全年分布特征相似，均呈现自北向南逐步升高的趋势。全省四季I_{CHB}呈现为春夏季逐渐上升，秋冬季逐步下降的变化趋势。

（3）温度与I_{CHB}存在极显著的正相关关系，而风速和湿度与I_{CHB}则表现为负相关，温度和风速是影响陕西省I_{CHB}的最主要因子，且二者影响程度基本相当，湿度主要通过温度影响I_{CHB}。全省3个地区温度和风速的直接通径系数绝对值均较大，说明各地区温度和风速对I_{CHB}直接影响较大。仅关中地区温度和湿度的间接通径系数达到了显著水平，说明关中地区温度和湿度之间存在显著的相互影响。陕北和陕南地区各要素间接通径系数均较小，说明各要素都是直接影响I_{CHB}，而各要素之间相互影响较小。

（4）陕西省地理气候条件复杂，本文主要利用温度、湿度和风速计算I_{CHB}，仅从3个气象要素方面考虑人体舒适程度，所得出的结论会存在一定不足。今后的研究应考虑多种气象要素、大气质量、人体差异、城市建设等多方面因素，建立更加完善的人体舒适度评价指标，对其进行更客观深入的分析，从而更好地开展专业气象服务。

参考文献（References）

[1] IPCC. 政府间气候变化专门委员会第五次评估报告[R]. IPCC, 丹麦: 哥本哈根, 2014. [IPCC. IPCC fifth assessment report[R]. IPCC, Copenhagen, Denmark, 2014.]

[2] 杨桂娟, 鄢志宇. 1954—2005年锦州气温变化及其受城市热环境的影响[J]. 气象与环境学报, 2008, 24(1): 40-43. [YANG Guijuan, YAN Zhiyu. Characteristics of air temperature and the impact of urban heat environment in Jinzhou from 1954 to 2005[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2008, 24(1): 40-43.]

[3] 封志明, 唐焰, 杨艳昭, 等. 基于GIS的中国人居环境指数模型的建立与应用[J]. 地理学报, 2008, 63(12): 1327-1336. [FENG Zhiming, TANG Yan, YANG Yanzhao, et al. Establishment and application of human settlements environment index model (HEI) based on GIS[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(12): 1327-1336.]

[4] 张书余. 城市环境气象预报技术[M]. 北京: 气象出版社, 2002: 24-125. [ZHANG Shuyu. Urban environmental meteorological forecasting technology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2002: 24-125.]

[5] 杨成芳, 薛德强, 李长军. 山东省人体舒适度区域特征研究[J]. 气象, 2004, 30(10): 7-11. [YANG Chengfang, XUE Deqiang, LI Changjun. Study of regional characteristics of body comfortability in Shandong[J]. Meteorological Monthly, 2004, 30(10): 7-11.]

[6] 贾海源, 陆登荣. 甘肃省人体舒适度地域分布特征研究[J]. 干旱气象, 2010, 28(4): 449-454. [JIA Haiyuan, LU Dengrong. Spatial distribution of human comfort degree in Gansu Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2010, 28(4): 449-454.]

[7] 郭广, 张静, 马守存, 等. 1961—2010年青海省人体舒适度指数

时空分布特征[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 845-54. [GUO Guang, ZHANG Jing, MA Shoucun, et al. Spatial-temporal distribution characteristics analysis of comfort of human body index in Qinghai Province from 1961 to 2010[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(3): 845-54.]

[8] 孙广禄, 王晓云, 章新平, 等. 京津冀地区人体舒适度的时空特征[J]. 气象与环境学报, 2011, 27(3): 18-23. [SUN Guanglu, WANG Xiaoyun, ZHANG Xinping, et al. Temporal-spatial characteristics of human comfort in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2011, 27(3): 18-23.]

[9] 曹伟宏, 何元庆, 李宗省, 等. 云南丽江旅游气候舒适度分析[J]. 冰川冻土, 2012, 34(1): 201-206. [CAO Hong wei, HE Yuanqing, LI Zongsheng, et al. Evaluation of the tourism climate comfort index in Lijiang City, Yunnan[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(1) : 201-206.]

[10] 官景得, 王咏青, 孙银川, 等. 近39 a宁夏旅游气候舒适期及变化分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 339-348. [GUAN Jingde, WANG Yongqing, SUN Yinchuan, et al. Suitable period and change of tourism climate in Ningxia in the past 39 years[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 339-348.]

[11] 刘文平, 刘月丽, 安炜, 等. 山西省近48年来人体舒适度变化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(3): 92-95. [LIU Wenping, LIU Yueli, AN Wei, et al. The human body comfort index change in Shanxi in recent 48 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(3): 92-95.]

[12] 于庚康, 徐敏, 于堃, 等. 近30年江苏人体舒适度指数变化特征分析[J]. 气象, 2011, 37(9): 1145-1150. [YU Gengkang, XU Min, YU Kun, et al. Analysis of variation characteristics of comfort index of human body in Jiangsu Province during the past three decades[J]. Meteorological Monthly, 2011, 37(9): 1145-1150.]

[13] 朱卫浩, 张书余, 罗斌. 近30年全国人体舒适度指数变化特征[J]. 干旱气象, 2012, 30(2): 200-226. [ZHU Weihao, ZHANG Shuyu, LUO Bin. Variation characteristics of comfort index of human body in China in recent 30 years[J]. Journal of Arid Meteorology, 2012, 30(2): 200-226.]

[14] 李树岩, 马志红, 许蓬蓬. 河南省人体舒适度气候指数分析[J]. 气象与环境科学, 2007, 30(4): 49-53. [LI Shuyan, MA Zhihong, XU Pengpeng. Analysis of human comfort climatic index in Henan Province[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2007, 30(4): 49-53.]

[15] LIU Y G, WANG N L, ZHANG J H, et al. Climate change and its impacts on mountain glaciers during 1960—2017 in western China[J]. Journal of Arid Land, 2019, 11(4): 537-550.

[16] 牟尧, 牟新之. 地壳隔热密封破坏——近百年气候与环境变化"发病机制"的数学验证[J]. 干旱气象, 2011, 29(3): 383-391. [MOU Yao, MOU Xinzhi. Destruction of the sealed crust heat insulation: Mathematical verification of "morbifical mechanism" resulting in climate & environmental change over the past one hundred years[J]. Journal of Arid Meteorology, 2011, 29(3): 383-391.]

[17] 刘吉峰, 王金花, 焦敏辉, 等. 全球气候变化背景下中国黄河流域的响应[J]. 干旱区研究, 2011, 28(5): 860-865. [LIU Jifeng, WANG Jinhua, JIAO Minhui, et al. Response of water resources in the Yellow River Basin to global climate change[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(5): 860-865.]

[18] 廉陆鹞, 刘滨辉. 近58 a我国西北地区干期与湿期变化特征[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1301-1309. [LIAN Luyao, LIU Binhui. Change characteristics of dry and wet spells in northwest China during the past 58 years[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1301-1309.]

[19] TERJUNG W H. Physiologic climates of the contentious United States: A bioclimatic classification based on man[J]. Annals of the Association of American Geographers, 1966, 56(1): 141-179.

[20] OLIVER J E. Climate and Man's environment: An introduction to applied climatology[M]. New York: John Wiley and Sons, 1973.

[21] DAVID D H. Handbook of applied meteorology[M]. New York: John Wiley and Sons, 1985.

[22] 马丽君, 孙根年. 中国西部热点城市旅游气候舒适度[J]. 干旱区地理, 2009, 32(5): 791-79. [MA Lijun, SUN Gennian. Evaluation of climate comfort index for tourism hot-spot cities in west China[J]. Arid Land Geography, 2009, 32(5): 791-797.]

[23] 石春娥, 王兴荣, 陈晓平, 等. 人体舒适度预报方法研究[J]. 气象科学, 2001, 22(3): 363-368. [SHI Chun'e, WANG Xingrong, CHEN Xiaoping, et al. Method study on forecast for body comfort index[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2001, 22(3): 363-368.]

[24] 刘梅, 于波, 姚克敏. 人体舒适度研究现状及其开发应用前景[J]. 气象科技, 2002, 30(1): 11-14. [LIU Mei, YU Bo, YAO Kemin. The research status and of human body comfort and its development and application prospects[J]. Meteorological Science and Technology, 2001, 22(3): 363-368.]

[25] 吴兑. 多种人体舒适度预报公式讨论[J]. 气象科技, 2003, 31(6): 370-372. [WU Dui. Discussion on various formulas for forecasting human comfort index[J]. Meteorological Science and Technology, 2003, 31(6): 370-372.]

[26] 胡琳, 胡淑兰, 苏静, 等. 陕西省人体舒适度变化及其对气象因子的响应[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1450-1456. [HU Lin, HU Shulan, SU Jing, et al. Variation of comfort index of human body and its response to meteorological factors in Shaanxi Province [J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1450-1456.]

[27] 雷桂莲, 喻迎春. 南昌市人体舒适度指数预报[J]. 江西气象科技, 1999, (3): 40-41. [LEI Guilian, YU Yingchun. Forecast of human comfort index in Nanchang[J]. Jiangxi Meteorological Science & Technology, 1999, (3): 40-41.]

[28] WOLFLE L M. Sewall wright on the method of path coefficients: An annotated bibliography[J]. Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal, 1999, 6(3): 280-291.

[29] 敬艳辉, 邢留伟. 通径分析及其应用[J]. 统计教育, 2006, (2): 24-26. [JING Yanhui, XING Liuwei. Path analysis and its application[J]. Statistical Education, 2006, (2): 24-26.]

[30] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. [XU Jianhua. Mathematical methods in modern geography [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.]

Spatial-temporal distribution characteristics of comfort index of human body in Shaanxi Province from 1971 to 2018

LEI Yang-na, ZHANG Xia, ZHAO Xiao-meng

(*Shaanxi Climate Center, Xi' an* 710014, *Shaanxi, China*)

Abstract: To reveal the change law of human comfort in Shaanxi Province, China under the background of climate change, the spatial-temporal characteristics of Comfort Index of Human Body (I_{CHB}) are analyzed using the daily meteorological data observed by 94 stations in Shaanxi Province from 1971 to 2018. At the same time, the weight of every influencing factor is analyzed statistically. Analysis results can provide references for urban atmospheric environment assessment and tourism climate resource development. Results indicated that: (1) The annual average I_{CHB} in Shaanxi presents an ascendant trend in the past 48 a, which reaches an extremely significant level. The linear increasing trend of I_{CHB} in Shaanxi is 0.07 each year. The inter-annual changes in each region are basically consistent with the changes in Shaanxi Province, with upward trends of $0.05\cdot a^{-1}$, $0.09\cdot a^{-1}$, and $0.05\cdot a^{-1}$, respectively. The I_{CHB} in each season presents obvious increasing trend, especially in spring with a linear trend of $0.1\cdot a^{-1}$. The increasing trend of I_{CHB} slowed down since the 21st century, and the I_{CHB} decreased after 2001 in autumn and winter. The annual variation of I_{CHB} in the four seasons of each region is consistent with the trend of the Shaanxi Province. The difference of I_{CHB} in summer is minimum, while the largest difference is observed in winter. Monthly changes of I_{CHB} are of single peak type with the lowest in January and the highest in July. (2) The I_{CHB} in Shaanxi is between 26 and 52, and the grade is cold and cool. The spatial distribution of I_{CHB} is significantly different in each region, with the highest in southern Shaanxi (40–52), followed by Guanzhong (26–48), and the lowest in northern Shaanxi (33–43). The distribution characteristics of I_{CHB} in the four seasons are similar to those in the whole year with all showing increasing trends from north to south. The I_{CHB} in the four seasons of spring, summer, autumn, and winter in the province shows a rising-rising-declining-declining trend. (3) By R/S nalysis, it was found that the Hurst values of most factors were greater than 0.5, indicating that in the future, temperature will continue to rise, wind speed will maintain the current decreasing trend, and the I_{CHB} will increase. The climate comfort in four seasons is also expected to change. As I_{CHB} rises in spring, autumn, and winter, the living environment may become more comfortable, but the increasing grade of I_{CHB} in summer may lead to more hot days. (4) Past analysis indicates that temperature is positively correlated with I_{CHB}, while humidity and wind speed are negatively correlated with I_{CHB}. Temperature and speed are the main factors affecting the I_{CHB}, and the absolute values of their correlation coefficients are higher than 0.7. Humidity affects the I_{CHB} by temperature. The positive effect of temperature and the negative effect of wind speed in the three regions are significant. Humidity also has a greater negative impact on I_{CHB} in northern Shaanxi and Guanzhong but less impact on I_{CHB} in southern Shaanxi. The three factors in Guanzhong have greater influence on each other, but the factors in northern Shaanxi and southern Shaanxi have little influence on each other, which have a direct impact on I_{CHB}.

Key words: comfort index of human body; spatial-temporal characteristics; path analysis; Shaanxi Province